

地上測量から見たフィリピン・マニラ首都圏南東部の地盤変動

Monitoring of Ground Deformation in South-East Part of Metro Manila, Philippines by Ground Survey

栗田 勝実¹⁾, 衣笠 善博²⁾, 出口 知敬³⁾, Rolly E. Rimando⁴⁾
 笹川 正⁵⁾, 野中崇志⁵⁾

Katsumi Kurita¹⁾, Yoshihiro Kinugasa²⁾, Tomonori Deguchi³⁾, Rolly E. Rimando⁴⁾
 Tadashi Sasagawa⁵⁾, Takashi Nonaka⁵⁾

Abstract : Buildings and pavements are damaged by vertical ground displacement along the creeping segment of the Marikina Valley fault system (MVFS) on the south-east part of Metro Manila, Philippines. To clarify fault creep trigger, ground deformation is monitored through repeated leveling surveys. And short term link between fault displacement and rainfall is also monitored through a continuous creep measurement device installed across one of the sites used for leveling survey. From repeated leveling surveys, the average slip rate since September 1999 to January 2010 ranges from 1.07cm/y to 2.16cm/y. Creep acceleration is observed in some leveling survey sites. Continuous creep measurement obtained an average slip rate of 0.01mm/day (3.65mm/y) until January 2009. However fault creep at NPC B appears to have stopped even with the coming of the rainy season in May 2009.

Keywords : Fault creep, Leveling survey, Continuous creep measurement, Slip rate, Metro Manila

1. はじめに

フィリピンの首都であるマニラ首都圏は、面積 636km² に人口約 1,500 万人が居住しているフィリピン最大の都市であると同時に、文化や経済の中心都市である。そのため、高層ビル、高速道路や LRT (Light Rail Transit) など、都市に必要なインフラストラクチャーが現在も構築されて続けている。一方、この地域には南北を縦断するマリキナ断層 (MVFS) が存在し、トレンチ調査の結果などから、断層の西側セグメントではマグニチュード M6～7クラスの地震を引き起こすだけのポテンシャルが蓄積されているとの評価がなされている^{1), 2)}。そのため、マニラ首都圏を対象とした地震防災に関する研究は、重要で、かつ急務な課題となっている。

また、マニラ首都圏南東部 Muntinlupa 市周辺の同断層周辺では、大きな地震が起きていないにもかかわらず、時間の経過と共に ①道路に段差が生じる ②ブロック塀や構造物にクラックが現れる ③家屋の柱が破壊し使用出来なくなる など、断層クリープが原因と考えられる地盤変動により被害が生じており (写真 1)、地域の大きな問題の一つとなっている。このことは都市の安全を構築するという視点に立てば、重要な問題の一つと捉える必要がある。そのため、地盤変動を定期的に観測し同断層のクリープ性状を解明することが必要である。

そこで、本研究ではフィリピン・マニラ首都圏南東部のマリキナ断層を対象として、繰り返し水準測量、および連続観測から、断層クリープの性状を探ることを目的とする。



写真 1 断層クリープによる変位で生じた道路段差

2. 対象地域のテクトニクス

フィリピン諸島は 7,000 以上の島から成り立っており、西側のユーラシアプレートがマニラ海溝に沈み込み、また、東側にあるフィリピン海プレートが東ルソン海溝、およびフィリピン海溝に沈み込むというサブダクション

1) 東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科 機械システム工学コース 2) 地震予知総合研究振興会
 3) 日鉄鉱コンサルタント 4) Philippine Institute of Volcanology and Seismology 5) 株式会社パスコ

ゾーンに位置している。また、ルソン島からミンダナオ島にかけ全長約 1,300km のフィリピン断層が縦断している。マニラ首都圏はルソン島中部に位置しており、フィリピン断層から分岐した西マリキナ断層が縦断している（図 1）。この断層は主に右横ずれ断層と推測されており²⁾、トレンチ調査の結果から、過去 1300 年間に 4 回の地震を起こし、再来周期は 400–600 年と推測されている¹⁾。また、マニラ首都圏東部にあるマリキナ平野は、西マリキナ断層とこれと平行な東マリキナ断層によって形成されたプル・アパート盆地構造となっている²⁾。

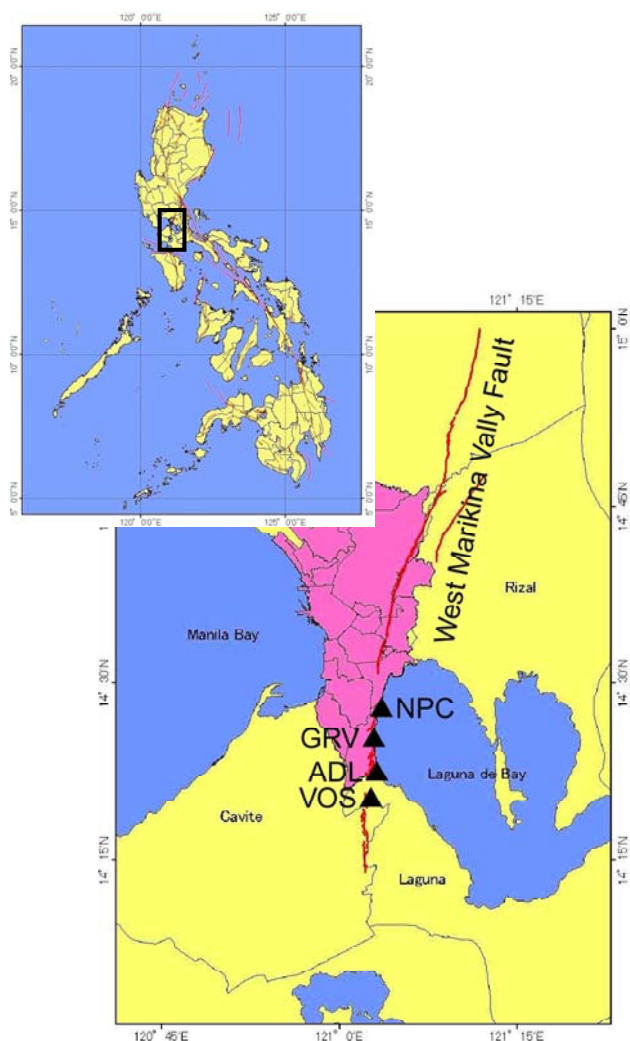


図 1 研究対象地域

3. 繰り返し水準測量

断層クリープによるすべり速度を測定するため、クリープが見られる断層セグメントにおいて短距離繰り返し水準測量を 1999 年 9 月から実施している。この断層に沿っては有意な水平変動が認められないことから、観測はデジタルレベル (TOPCON DL-103) とバーコードレベルスタッフを用いた水準測量法を採用した。観測は、

当初 4 地点 8 測線にて 3 ヶ月毎に実施していたが、現在は 4 地点 6 測線にて 6 ヶ月毎に実施している。

測量から得られた結果を図 2 に示す。6 測線の中で、明瞭なクリープ性変位が現在でも観測される地点は、VOS だけとなっており、平均 1.70cm/y の鉛直変位速度を示している。明瞭な段差が道路上に現れている NPC では（写真 1）、1999 年の観測開始以来、測線 A (NPC-A) ではクリープ性変位が見られない。一方、測線 B (NPC-B) および測線 C (NPC-C) は、2007 年 11 月まで連続的にクリープ性変位による変動が現れており、鉛直変位速度は 0.54–1.88cm/y である。また GRV では、3 測線全てで 2010 年 3 月まで連続的に変動が現れた。測線 A (GRV-A) は、当初鉛直変位速度が 0.29cm/y であったが、2002 年 3 月以降から加速し、2003 年 10 月までは 2.07cm/y、2010 年 3 月までは 2.91cm/y となり、現在、クリープ運動は停止している。また、測線 B (GRV-B) および測線 C (GRV-C) では、1.60cm/y と 2.60cm/y で推移していたものが、2011 年 6 月から -0.17cm/y と非常に小さい値にせよ運動方向が反転しはじめています。

なお、2012 年 8 月に現地を襲った台風により、NPC の全測線および GRV-A が水没したため、9 月の観測は欠測となっている。

4. 連続観測

断層クリープの変化性状を詳細に調査するため、NPC-B 測線に連続観測装置を取り付け 2008 年 9 月から観測を続けている³⁾。観測システムを写真 2 に示す。センサー部は、ひずみゲージ式変位計（東京測器研究所 SDP-50C）、および、温度センサー（TPT-100）で構成し、それらを防水ケースに入れモジュール化してある。これをステンレスパイプに取り付け断層境界上に設置した。また、雨量を計測するために雨量計（Davis 7852M-L10）を近傍に併設した。これらから送られてくる信号をデータロガー（CAMPELL CR-510）へ入力し、2 時間または 3 時間のサンプリング間隔で収録している。なお、観測地点では商用電源の利用が困難なことから、ソーラーパネルで発電した電力を鉛蓄電池に充電しながら観測システムへ供給・運用する形態を採用した。

2008 年 9 月中旬に設置工事を行い、観測を開始した。変位計やデータロガーの故障などにより一時中断した期間はあるが、2012 年 9 月現在も継続している。2008 年 9 月 14 日から 2009 年 7 月 17 日までのデータを用いた観測システムを図 3 に示す。2009 年 1 月までは 0.01mm/d (3.65mm/y) の変位速度で東側が沈降（または西側が隆起）しているが、それ以降変動は見受けられない。

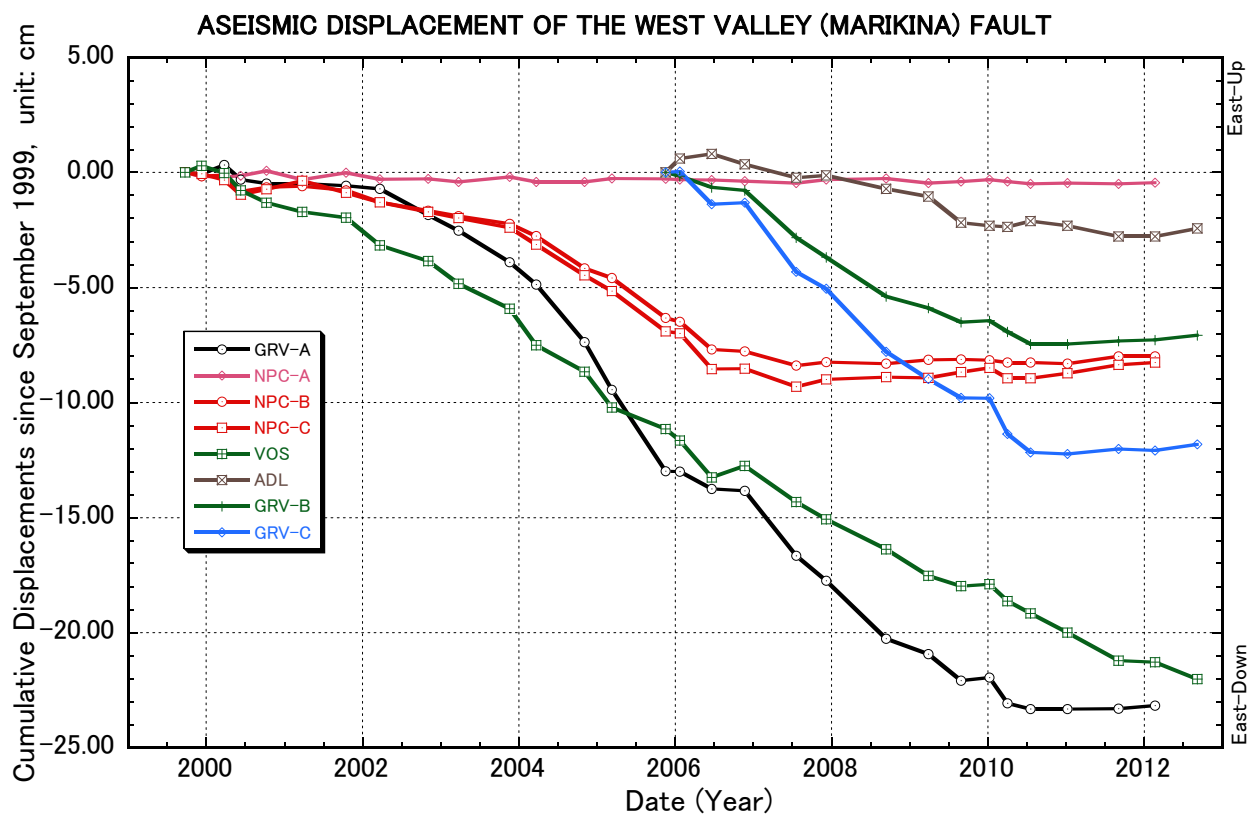


図2 繰り返し水準測量によるマニラ首都圏の地盤変動の時間変化



写真2 観測システム

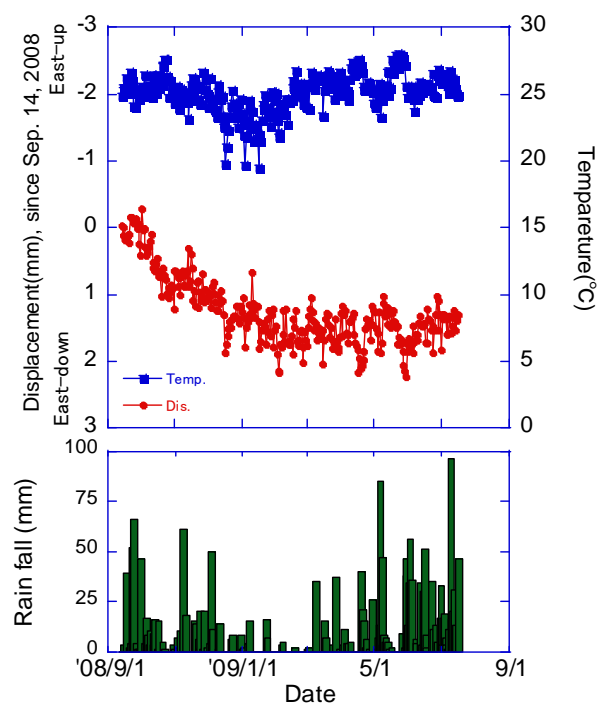


図3 上図：毎6:00の気温と変位
下図：日降水量

5. 議論

マリキナ断層南部周辺でクリープ性変位が現れている原因としては2つ考えられる。一つはマニラ首都圏の急激な発達に伴う地下水の汲み上げ、もう一つは地殻変動によるものである。

合成開口レーダー (SAR) を用いた干渉 SAR の時系列解析から、マニラ首都圏の数地点で明瞭な地盤変動があることを Deguchi らが指摘している⁴⁾。それによると、解析により検出されたマニラ首都圏の鉛直方向の変動は、

同地域の地下水位の変化と正の相関が見られる。しかし、一部地域の変動は地下水位の変化に依存しておらず、かつ、断層走向に対して平行な分布をしていることから、原因が地殻変動による可能性を示している。

出口は西マリキナ断層南部の GRV 地域における干渉 SAR の結果と JICA が実施したマニラ首都圏の地下水位調査および、それを基にした地下水位変化の予測と比較した⁵⁾。その結果、地盤変動の変位速度は 2005 年から 2007 年は 1.0cm/y から 2.0cm/y であったが、2007 年以降は -1.0cm/y と運動方向が逆転をし始めた。変位速度の値には若干の差があるにせよ、この傾向は繰り返し水準測量の結果と一致している。一方、同地域の地下水位の明瞭な変化は確認されておらず、また予測結果にも現れていない。

Roseloffs は⁶⁾、アメリカ・サンアンドレアス断層に沿う地盤変動が雨量や季節変動による土の力学的変化で影響を受けることを指摘している。台湾の Chihshang 断層で起きているクリープの調査では、例えば、すべり速度が雨期による降水量の増加と共に増加するように、季節依存性を示すことを報告している^{7), 8)}。西マリキナ断層の場合では、2008 年 9 月から 2009 年 1 までの変位変化だけを見ると雨量との間に逆相関があるように見受けられるが、観測期間全体で見ると降水量の変化との間に相関は見られない。

以上のことから、西マリキナ断層南部周辺でクリープ性変位が現れている原因は地殻変動である可能性が非常に高い。

6. まとめ

フィリピン・マニラ首都圏を縦断するマリキナ断層のクリープ断層セグメントにおける変動を観測するため、繰り返し水準測量および連続観測を実施した。水準測量から 1999 年 9 月から 2010 年 1 月までの間の平均スリップ速度は、1.77cm/y から 2.45cm/y、2004 年から数点においてクリープの鉛直変位速度は加速した。一方、連続観測から 2008 年 9 月から 2009 年 1 月中旬までは 0.01mm/day (3.65mm/y) の速度で断層の累積変位が大きくなる方向に変位が生じたが、その後は活動を停止している。短期間ではあるにせよ、クリープ性変位と降水量の間には強い相関は見られない。本断層の性状を解明するためにも、今後も繰り返し水準測量および連続観測を続ける必要がある。

7. 参考文献

[1] Nelson, R. A., S. F. Personius, R. E. Rimando, R. S. Punongbayan, N. Tungol, H. Mirabueno and A.

Rasdas, Multiple Large Earthquakes in the Past 1500 Years on a Fault in Metropolitan Manila, the Philippines, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **90**, 1, 73-85, 2000.

[2] Rimando, R. E. and P. L. K. Knuepfer, Neotectonics of the Marikina Valley fault system (MVFS) and tectonic framework of structures in northern and central Luzon, Philippines, *Tectonophysics*, **415**, 17-38, 2006.

[3] 栗田勝実, 衣笠善博, R. Rimando and K. Papiona, 連続変位観測記録から見たフィリピン・マニラ首都圏にあるマリキナ断層のクリープ性状, 東京都立産業技術高等専門学校研究紀要, 第 5 号, 6-9, 2011.

[4] Deguchi, T., Kinugasa Y. and Kurita K., Monitoring of Land Deformation using Terra SAR-X Data around Active Fault in the Metro Manila, the Philippines, *FIG Working Week 2011*, TS02E - Land Deformation, 5278, 2011.

[5] 出口知敬, 広域地盤変動計測への干渉 SAR の適用性と実用化に関する研究, 東京大学大学院工学系研究科博士論文, 2009.

[6] Roeloffs, E. A., Creep rate change at Parkfield, California, 1966-1999: seasonal, precipitation induced, and tectonic, *J. Geophys. Res.*, **106**, 16, 525-16,547, 2001.

[7] Lee, J.C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, and F. S. Jeng, Continuous monitoring of an active fault in a plate suture zone: a creepmeter study of the Chihshang Fault, eastern Taiwan, *Tectonophysics*, **333**, 219-240, 2001.

[8] Lee, J. C., J. Angelier, H. T. Chu, J. C. Hu, and F. S. Jeng, Monitoring active fault creep as a tool in seismic hazard mitigation. Insights from creepmeter study at Chihshang, Taiwan, *Tectonophysics*, **337**, 1200-1207, 2005.